基于 SDN 的 WLAN 负载感知切换方案实现 *

赵国锋 [1,2]，黎　军 [1]，王新恒 [1]，陈　攀 [1]，葛长威 [1]

(1. 重庆邮电大学 电子信息与网络研究院，重庆 400065；2. 重庆市光通信与网络高校重点实验室，重庆 400065)

摘　要：基于软件定义网络将网络的控制平面与转发平面分离，并提供开放的可编程接口等特点，提出一种基于 SDN 的 AP 负载感知的切换算法，去减少网络中频繁切换和使 AP 间负载相对均衡。该方法利用 SDN 集中控制功能，实时监控 AP 的网络状态信息，并由控制器判断 AP 负载状态和预测终端运动状态来辅助切换过程。实验结果表明该切换方法可以减少切换次数和平衡 AP 间的负载，保证用户网络服务质量。

关键词：软件定义网络；可编程接口；负载均衡；信息状态

中图分类号：TN915.07　　doi: 10.3969/j.issn.1001-3695.2017.12.0767

Implementation of WLAN load aware handover method based on SDN

Zhao Guofeng[1, 2], Li Jun[1], Wang Xinheng[1], Chen Pan[1], Ge Changwei[1]

(1. *Institute of Electrical Information & Network Engineering*, *Chongqing University of Posts & Telecommunication*, *Chongqing* 400065, *China*; 2. *Optical Communication & Network Key Laboratory of Chongqing*, *Chongqing* 400065, *China*)

Abstract: Based on the software-defined network that separates the control plane of the network from the forwarding plane and provides an open and programmable interface, this paper proposes a handover algorithm based on SDN for AP load sensing to reduce frequent switching in the network and make the load between APs relatively balanced. The method uses the centralized control function of SDN to monitor the network status information of the AP in real time and the controller assists the load status of the AP and predicts the terminal movement status to assist the handover process. The experimental results show that this method can reduce the switching times and balance the load between APs to ensure the quality of service of users.

Key words: software-defined networking; programmable interface; load balance; information status

0　引言

基于 IEEE 802.11 协议标准的无线局域网 (Wireless Local Area Networks，WLAN)凭借可以为移动用户提供高吞吐量和支持大量用户接入等特点已经被广泛地应用在无线互联网的接入中。但是随着网络规模和用户数的日益扩大，同时用户网络服务需求越来越复杂化[1]。为保证移动用户的网络服务质量，必须实现在网络中的快速切换，而传统 WLAN 中，采用基于接收信号强度 RSS(Received Signal Strength)传统切换方法会造成 AP 间负载不均衡和产生不必要的切换[2]，即乒乓效应，最终降低网络整体性能。如何在切换时保证用户的服务质量成为研究热点。

针对 WLAN 中的需求，已经有学者展开了这方面的研究。RSSH 算法[3]通过引入迟滞余量 H 可以一定程度上减少乒乓效应。由于仅当 AP 的信号质量足够好才触发切换，所以该算法很可能导致业务中断。基于 RSS 预测的驻留时间算法[4]其中心思想是设置一个时间阈值 TTH 和 RSS 切换阈值。当 RSS 大于阈值，开始计时，若时间大于 TTH 后，大小关系依然满足，则发生切换。否则，保持当前关联。该算法可以减少切换次数，却增加了切换时延。双门限算法[5]，该算法中设置两个阈值 TI 和 T2，且 TI>T2。设置双门限，相当于给了 RSSI 波动空间，可以一定程度上缓解在密集部署 AP 环境下，AP 切换带来的乒乓效应。以上算法可以减少乒乓效应，但是并没有缓解 AP 间的负载均衡问题。

为此，本文提出一种基于 SDN 的 WLAN 负载感知切换算法来平衡 AP 间负载和缓解乒乓效应的影响。为验证所提方法的有效性，搭建了原型系统并作算法验证。下面主要对切换中存在的问题做详细分析。

1)WLAN 中乒乓效应分析。

乒乓效应是指用户在 AP 间的重叠区域因切换触发条件设置单一、固定引起的不必要的频繁切换过程，这种切换会造成网络资源的过度浪费和占用。如下图 2 中 STA 处于 三个

基金项目：国家自然科学基金资助项目（61402065）

作者简介：赵国锋（1972-），男，重庆人，教授，博导，主要研究方向为互联网技术、软件定义网络；黎军（1991-），男（通信作者），湖北荆州人，硕士研究生，主要研究方向为 SDN、LTE 无线接入网技术；王新恒（1988-），男，山东枣庄人，博士研究生，主要研究方向为未来网络；陈攀（1993-），男，四川成都人，硕士研究生，主要研究方向为未来网络；葛长威（1990-），男，河南安阳人，硕士研究生，主要研究方向为未来网络、无线网络优化.

AP 的重叠区域，如果 $RSS_{present}$ 与 RSS_{target} 大小关系在短时间内不确定，就会造成 STA1 会在 3 个 AP 之间来回关联，即乒乓效应。

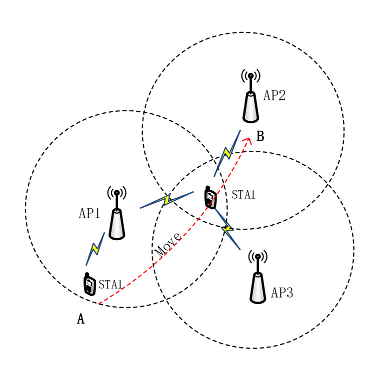


图 1　乒乓效应场景图

2）WLAN 中 AP 负载不均衡分析。

AP 间负载不均衡指在切换发生后 STA(Station)不能选择合适的 AP 作为新的目标接入点，而导致用户速率下降和降低网络整体性能的一种现象。如传统 WLAN 中，STA 采用 RSS 值最大的方法选择目标 AP，这种方式会让多个 STA 集中关联在某个 AP 或某些 AP。在密集部署的场景中，多个 AP 覆盖范围相互交叠，如下图 2 所示。根据文献[6]，当多个 STA 接入同时接入一个 AP 后，每个 STA 获得的带宽大小是一样的。文献[7]给出了每个 STA 的传输速率计算方法，公式如下：

$$R=\frac{1}{\sum_{i=1}^{N}\frac{1}{R_i}} \tag{1}$$

其中：R_i 表示对应 STA_i 对于 AP 的传输速率。假设在图 1 部署场景中部署 8 个 AP，覆盖区域相互重叠，实线表示当前连接，虚线代表可能的链接,线上的数字代表传输速率，单位为 Mbps。STA1、STA2、STA3 和 STA4 分别与 AP1、AP2 和 AP3 关联。STA1、STA2、STA3 和 STA4 的速率分别为 22 Mbps、9 Mbps、13 Mbps、7 Mbps，系统吞吐为 51 Mbps。当 STA2 从右往左移动，由于 AP1 的 RSS 大于 AP2 和 AP3，STA2 重新与 AP1 关联，此时 STA1 与 STA2 速率相等且为 7.2 Mbps，系统吞吐为 34.4 Mbps。前后对比，系统吞吐下降 16.6 Mbps，系统资源利用率为 32.5%。这是由于 STA2 关联 AP1 后共享了 STA1 的网络带宽，不仅拉低自身速率，也会拉低系统整体吞吐量。

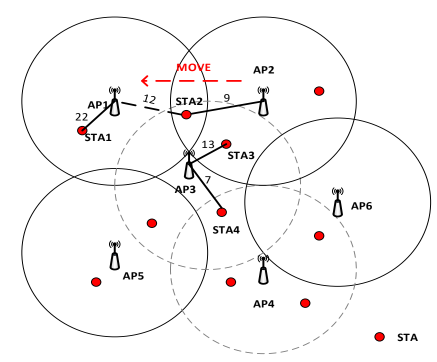


图 2　AP 负载不均衡场景

1　基于 SDN 的负载感知切换方法设计

对于传统的 WLAN 切换过程中，终端采用 RSS 作为切换触发条件和 STA 接入 AP 的标准。结果会导致 AP 间负载偏差较大，无法充分利用资源。软件定义无线网络(Software-Defined Wireless Local Network, SDWN)作为 SDN[8]在无线网络中的应用扩展，其主要思想是将无线网络设备的控制和转发进行分离[9]，将控制功能转移到 SDN 控制器，物理 AP 只需处理数据转发。SDN 集中控制的特点为解决 WLAN 中传统切换带来了新方向。

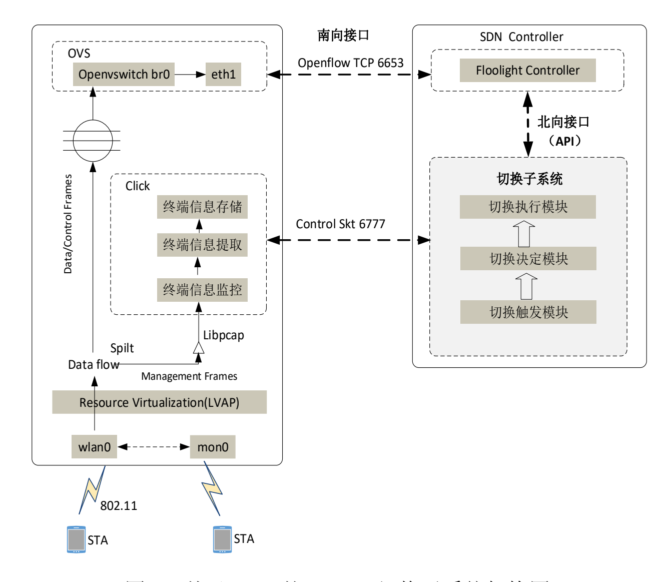


图 3　基于 Odin 的 SDWN 切换子系统架构图

目前比较主流的 SDWN 系统架构为 Odin[10] 和 CloudMAC[11]，两者都利用 VAP 的概念都能实现快速切换来减少切换时延，并保证用户的服务质量，但是均采用的 RSS 切换方法容易导致 AP 间的负载不均衡。其中 VAP 是指将物理 AP 的控制功能进行抽象，转移功能到其他设备上完成，物理 AP 只负责数据的转发和交付从而简化网络设备的管理。两者同之处在于前者的 LVAP 由 SDN 控制器创建和跟踪，其维护在物理 AP 上，而后者的 VAP 则驻留在云端服务器。

综合上述分析和考虑到 Odin 比较小巧、容易实现且比较适合开发上层应用来满足不同网络需求，本文将以 Odin 为基础构建 SDWN 切换系统，其系统架构如上图 3 所示。Floodlight[12]控制器通过 OpenFlow[13]协议与安装 OpenVswitch 的 AP 建立通信连接，借此获取全网的网络拓扑信息，最后实现对全网设备的管理；利用控制平面提供的开放 API 应用编程接口，服务提供商可完成多种应用需求，包括负载均衡、移动管理等。本文主要是做应用层的切换子系统管理开发，如上图所示，应用层中的切换子系统与 Click 组件中的 agent 代理之间创建 socket 连接获取终端信息来综合决策切换，在 agent 模块中维护用户 STA 的 LVAP，LVAP 中包括用户的认证关联等信息。子系统包括 3 个模块，其中切换决定模块，主要是为 STA 选择合适的目标 AP，通过采用 AP 负载感知方法实现。切换执

行模块是将 STA 重关联到新接入点。基于该平台提出一种基于 SDN 的 WLAN 负载感知切换方案(Software Defined Wireless Networks Load-aware Handover, SLAH)。

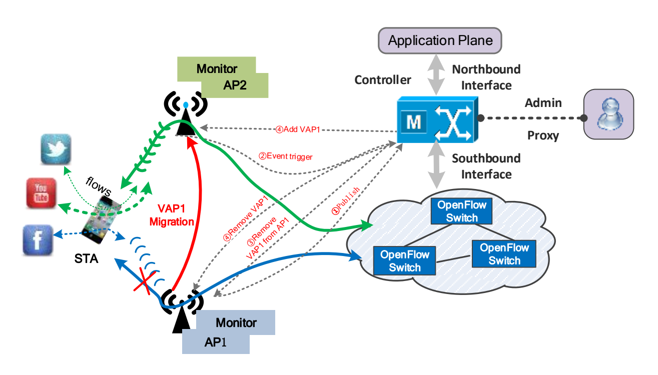


图 4 STA 切换过程

本文采取 RSS 预测终端运动状态并结合 AP 负载状态来辅助切换决策。SDN 控制器(SDN controller, SC)通过订阅 AP 消息(图中标号 1 所示)如信号强度，然后开始检测每个 AP 的信号，如果大于设置的阈值则触发切换过程。如上图 4 所示，此时 STA2 向 AP2 移动且 AP2 的信号强度大于 AP1，接着切换过程开始(图中标号 2)，然后 SDN 控制器 SC 开始选择目标 AP。本文所提 SLAH 思想是当切换发生后，SC 实时提取物理 AP 负载信息分析并为每个可视 AP(STA 探测到的 AP)计算一个权值(可接入 AP 权值)。对于关联 STA 少，信道利用率低，RSS 大的 AP2 为其设置较大的权值，因为此时 AP2 空闲；否则设置较小的权值。权值的计算在 SC 中完成，SC 按照计算结果大小将 AP 状态分为满负荷、空闲两个等级，其中空闲对应的 AP 被加入到列表中生成可接入列表，从可接入列表中选择最大的权值作为 STA 的目标 AP。最后，SC 下发控制信息，命令 AP1 删除其为 STA 维护的 VAP1(图中标号 3 所示)，同时在 AP2 上增加 VAP1(图中标号 5 所示)，从而实现无缝切换。通过 SLAH 可以使 AP 间负载相对均衡，保证用户网络服务质量。

为实现 SLAH，需将 AP 收集的信息上传至控制器，这里本文在数据包中加入一个新字段，消息具体格式见下图 5。其头部为 UPDATE_AP_LEVEL，数据部分为 AP 状态信息 AP_LOAD_INFO，这部分信息将在 Agent 中 LVAP 中进行封装，然后通过 Agent 代理模块与控制器中的 Master 建立 Socket 连接最后传至控制器处理。

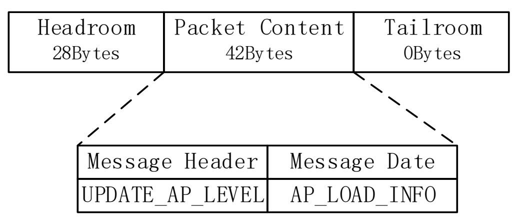


图 5 AP 状态信息格式

2 基于 AP 负载感知的切换方法

研究发现切换过程一般包括切换触发、AP 选择、切换执行等三个阶段，切换触发主要关注乒乓效应问题，AP 选择则是 AP 间负载均衡，切换执行则是要求 STA 在尽可能短的时间内关联到目标 AP 上，保证切换时延。本文基于 Odin 构建切换原型系统，通过引入虚拟 VAP，保证切换时延在 30ms 内。本文主要解决前两个阶段中存在的问题，即乒乓效应和 AP 间负载均衡。本节将主要介绍影响切换性能的参数、终端 STA 运动状态估计、可接入 AP 权值计算、SLAH 切换流程及伪代码分析。

2.1 影响 WLAN 切换性能的参数及计算

针对负载均衡问题，采用的切换方法需要综合考虑多个切换因素。本文选取的参数主要包括信号接收强度 RSS 值、AP 关联 STA 数目、AP 信道可用率。其中 RSS 的大小可以直接反映接入点 AP 的优劣；STA 个数越多，AP 可用带宽越小，特别当利用 RSS 作为 AP 接入标准时，多数 STA 容易关联到某一部分 AP 上；信道可用率越大，AP 下可挂载 STA 的能力越强。因此，SC 可以根据 RSS 和 AP 的负载状态来综合决策，相关计算公式如下：

AP 无线信道负载利用率[14] $Load_{ch}$ 和 AP 上 STA 数量 N_k 作为 AP 负载状态估计。根据文献 IEEE 802.11k 标准，信道负载为信道在一定时间内的繁忙时间 T_{CBT} (Channel Busy Time)与时间周期 T 之间的百分比。 $Load_{ch}$ 和 AP 负载状态计算公式如下：

$$\sum_{j=1}^{N-1} p > P_{THR} \tag{2}$$

$$L_k = \begin{cases} 0 & N_k = 0 \\ \dfrac{\sum_{i=1}^{i=N_k} \dfrac{Throughput_i}{NegotiationRare_{i,k}}}{N_k} & N_k > 0 \end{cases} \tag{3}$$

$$Load_k = Load_{ch}*0.8 + L_k*0.2 \tag{4}$$

式(2)为时间周期 T 内，信道的利用率；式(3)中 L_k 表示 AP_k (j 为第 j 个 AP)在一段时间内信道的平均利用率，它反映了关联在当前 AP 上所有 STA 对信道的占用情况，且 $Throughput_i$ 为 STA_i 的平均吞吐速率， $NegotiationRare_{i,k}$ 为 STA_i 与 AP_k 之间理想的平均速率。当没有 STA 接入 AP_k 时， $L_{i,k}$ 取为 0；当有 STA 接入时， $L_{i,k}$ 的取值为式(3)。

式(4)计算 AP_k 的利用率，其值为 $Load_{ch}$ 和 $L_{i,k}$ 权值之和。其中权值 $Load_{ch}$ 为 0.8， $L_{i,k}$ 为 0.2。

接收信号强度值 RSS 由于环境等因素，其值会在同一地点不同时间发生波动，为了减少这种变化造成的影响，对接收到的 RSS 做如下平滑处理。在较短周期 T 内，对接收到的 RSS 进行从大到小排序，取前 K 个 RSS，再对其取平均值，得到 $\overline{RSS}$ 。为了更加准确计算 RSS，考虑上一周期内平均 RSS 对其影响，最后计算公式如下：

$$\text{RSS} = w*\overline{RSS}_{T-1} + (w-1)*\overline{RSS}_T \tag{5}$$

2.2 可接入 AP 权值计算

由于信号强度可以直接反映当前无线信道的通信质量，当

移动终端 STA 距离关联 AP 远，则信号强度较强；相反，则信号强度较弱。基于以上分析，可以利用信号强度值的前后变化量来对移动终端的运动状态进行估计。

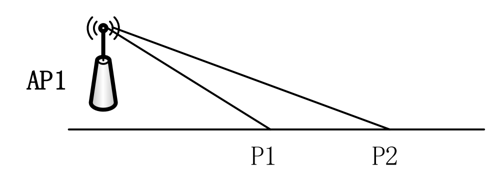


图 5 终端 STA 与接入点 AP 运动模型

如图 5 所示，利用式(4)计算信号强度的大小，并将 P2 与 P1 处的信号值之差 Δrss 作为 STA 运动状态估计，如果差大于 0，表示 STA 向 AP 靠近，应该保持当前连接状态；如果小于 0，则表示 STA 远离当前 AP,应该触发切换过程为终端选择服务质量更好的 AP，来保证用户的网络服务。但是，为了保证预测的准确性，对每个点在一段时间 NT 内，统计信号强度值之差，并将结果做累加，最后将计算结果与设定的阈值做比较。相关计算公式如下：

$$p(\Delta rss)=\begin{cases}1 & \Delta rss>0\\0 & \Delta rss<0\end{cases} \tag{6}$$

$$\sum_{j=1}^{N-1}p>P_{THR} \quad 成立 \tag{7}$$

函数 p 表示，STA 运动结果估计，如果信号值之差大于 0，则函数值为 1，否则，为 0。式(6)为一段时间 NT 内的计算结果，以该值与阈值 P_{THR} 作差，如果该公式大小关系成立，则表示 STA 正在靠近当前关联 AP。

2.3 可接入 AP 权值计算

研究发现切换过程一般包括：切换触发、AP 选择、切换执行等三个阶段，本文主要解决后两个阶段中存在的问题，即 AP 间负载均衡和保证切换时延在 30 ms 内。STA 如何选择合适的 AP 作为新的接入点，关系到 AP 间负载是否均衡。比如，AP 的 RSS 很大，但是负载很重，这种情况下发生切换只会导致网络整体性能下降，而采用 RSS 加 AP 负载综合决策可以避免这种切换。为此，本文将 AP 的接入用户终端数，信道负载和接收信号强度综合考虑，引入一个新的接入评价标准，权值 $W_{i,k}$，其计算公式如下：

$$W_{i,k}=\frac{RSS_{i,k}*(1-Load_k)}{N_k+1} \tag{8}$$

其中 $W_{i,k}$ 表示 STA_i 关联到 AP_k 的权值，值越大，表示 AP 上可利用资源越多，STA 越应接入该 AP。

为了说明式(5),构建了如图 1 所示的实验场景，STA2 处在 AP1、AP2、AP3 三个物理 AP 的覆盖范围内，会接受来自三者的信号强度值。依据上述公式并计算 STA 可视 AP 的接入值，如表 1 所示。

从表 1 中可知，AP2 的 STA 数量最少，带宽可用率最大，计算的权值也最大，即 SC 将 AP2 作为 STA 的目标 AP 并进行关联。AP3 的 RSS 虽然大于 AP2，但是其 STA 数目大于 AP2 且带宽可用率比较低，计算的权值 W 也比 AP2 小。所以综合考虑以上两种因素计算 W，以 W 的大小综合选择目标 AP。这样能有效避免因为 STA 依靠 RSS 选择接入点而导致的负载不均衡和在 AP 交叠区域的频繁切换。

表 1 AP 可接入权值统计表

AP	AP 可用带宽	信号强度	STA 数目 N	接入点权值 W
AP1	43.11	38	1	8.17
AP2	79.5	23	1	9.14
AP3	27.33	50	2	4.56

2.4 SLAH 切换流程

WLAN 中 AP 负责多个终端接入，若某 AP 承担的业务已经饱和，终端仍接入该 AP 以享受网络服务，那么服务质量难以保证。SLAH 中的 AP 权主要用于 AP 的选择阶段，其主要解决 AP 选择性问题。但是为了减少不必要的切换过程，采用一段时间内 RSS 前后变化之差的累加和来判断当前终端 STA 的运动状态，具体见图 5 所示的切换流程图。

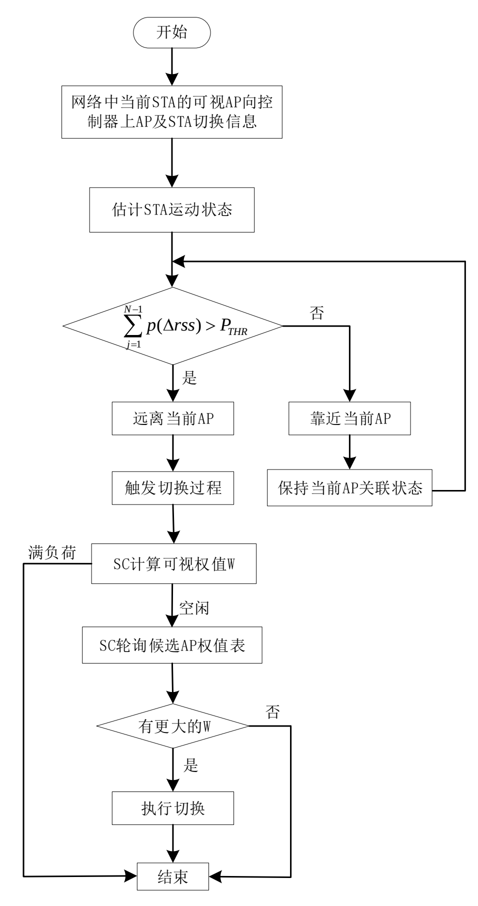


图 5 STA 切换流程

如果 $\sum_{j=1}^{N-1}p>P_{THR}$ 成立，则表示 STA 将远离当前 AP，则触发切换过程，然后控制器 SC 计算权值 W；否则，表示终端 STA 靠近当前关联 AP，此时不需要触发切换过程并保持当前关联状态，之后进入下一个运动状态估计周期。

切换过程被触发后，SC 计算可视 APs 的负载 $Load_k$，SC

通过比较 $Load_k$ 与负载阈值 $Load_{THR}$ 的大小关系，将 AP 状态分为满负荷和空闲两类，空闲 AP_k 为 STA 的可能接入点。SC 计算 AP_k 的权值 $W_{i,k}$，生成当前 STA 可接入候选 AP 列表 $LightAP$，通过轮询从 $LightAP$ 中选择权值最大的 $W_{i,m}$ 的 AP 作为 STA 切换后新的接入点。SC 根据切换后 STA 关联 AP 状态重新计算 W 并更新列表。由于更新后列表中 AP 的权值能反映对应 AP 实时负载状态，使切换可以依据负载状态选择合适的 AP 作为目标 AP。

SLAH 算法伪代码如下：

SLAH 算法

INPUT:STA's visible AP list: AP_{list}、visible AP weightage list: $VisibleWeigh_{list}$、RSS 、$Load_{ch}$、N_k

OUTPUT: handover or not

SC sends initial handover subscription message to visible APs in WLAN system

SC updated AP_{list} and $LightAP_{list}$ periodically

Initialization: $LightAP_{list}$ and $AP_{Candidates} \leftarrow \varnothing$

if $\sum_{j=1}^{N-1} p > P_{THR}$ then

  for each $AP_k\left(AP_k \in AP_{list}\right)$ in STA_i's visible AP list do

    $W_{i,k} = RSS_{i,k} * \left(1 - Load_k\right) / \left(N_k + 1\right)$

    if（$Load_k > Load_{THR}$）then

      $VisibleWeigh_{list} \leftarrow VisibleWeigh_{list} \cup \{W_{i,k}\}$

      $AP_{Candidates} \leftarrow AP_{Candidates} \cup \{AP_k\}$

    else

      AP level is overloaded

    end if

  end for

  for each $AP_k \in AP_{Candidates}$ in Candidate AP list do

    if（$W_{i,m} < W_{i,k}$）then

      m=k

    end if

  end for

    Handover the STA_i to the AP_m

    $AP_{Candidates} \leftarrow AP_{Candidates} \setminus \{AP_m\}$

end if

3 实验结果及性能测试

3.1 SDWN 系统部署

为验证方法的有效性，搭建了 SDN-WLAN 实验平台并对提出的 SLAH 算法进行性能验证。原型系统由 floodlight 控制器，无线接入点 AP 组成，并通过 SDN 交换机组成一个 WLAN。通过对重庆邮电大学逸夫实验楼三楼地形、线路、交换机位置等因素进行勘查，明确部署环境，并进行了网络规划，设计了如图 6 所示的实验平台部署平面分布图。

3.2 SDWN 切换性能测试

图 7 只是系统拓扑的部分，以此图来说明。为了验证本文所提方法的有效性，采用图 4 的拓扑结构来验证分析，采用 2 个物理 AP 和两个测试手机。初始状态，测试手机 STA1 和 STA2 都与 AP1 关联，在 STA2 中运行 ipref[15]来测试下行 TCP 吞吐。为了说明所提方法，建立了两个实验，两个实验的运行时间为 60 s，重复 5 次，结果取均值。

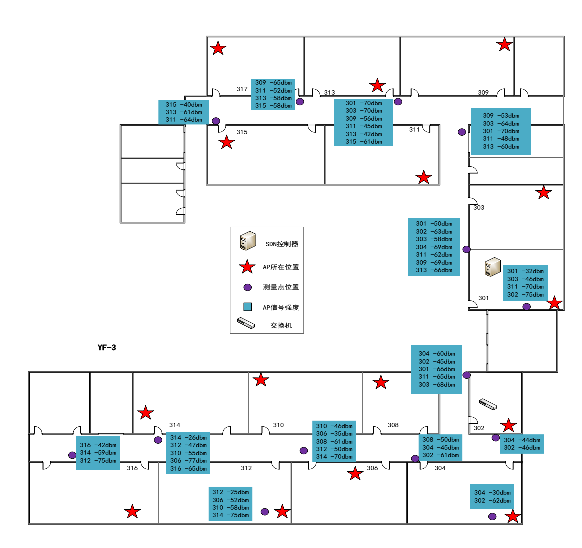


图 6　SDWN 实验平台实际部署平面分布图

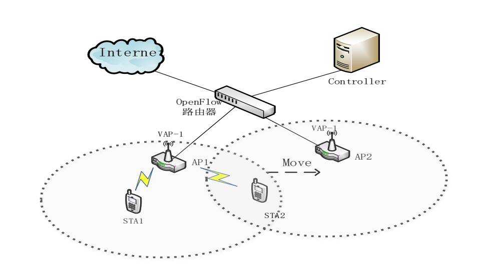


图 7　SDWN 切换测试场景 1

图 8 为实验 1 测试结果。测试过程中，初始 STA1 和 STA2 与 AP1 关联，并且 STA2 开始向 AP2 持续移动，当 STA2 处于 AP1 与 AP2 的重叠区域停止移动。此时，AP1 与 AP2 的 RSS 大小相近不足以触发切换，所以在传统 WLAN 中 STA2 继续与当前 AP1 保持连接，STA2 共享 STA1 的网络带宽。而利用 SLAH 方法，由于此 AP2 的负载低，可用带宽大，在 22 s 后，STA2 切换到 AP2。从图 7 可知，相比 WLAN，采用负载自适应算法，TCP 下行速率可以提高大约 17 Mbps。

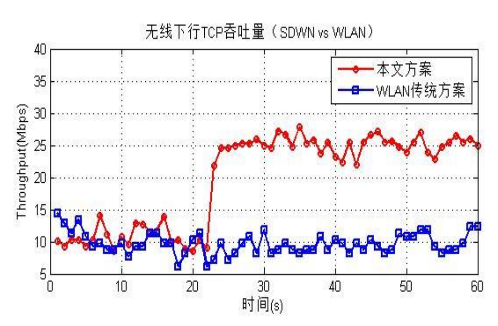


图 8　实验 1TCP 下行吞吐测试

图 9 是实验 2 结果。初始 STA1 和 STA2 分别与 AP1 和 AP2 关联且 STA2 向 AP1 移动。在 WLAN 中，在重叠区域由于 AP1 的 RSS 值比 AP2 的大，导致 STA2 执行切换过程并重新与 AP1 关联。此时 STA2 共享 STA1 的带宽，导致 STA2 的速率从 26Mbps 下降到 12Mbps。而采用 SLAH 方法，控制器发现 AP1 的负载较重，不发生切换过程，即 STA2 继续保持与 AP2 的关联。从上面分析可知，本文提出的 SLAH 方法，可以使 APs 间的负载达到相对均衡，提高用户下行速率，同时也可以避免不必要的切换过程，提高网络资源利用率。

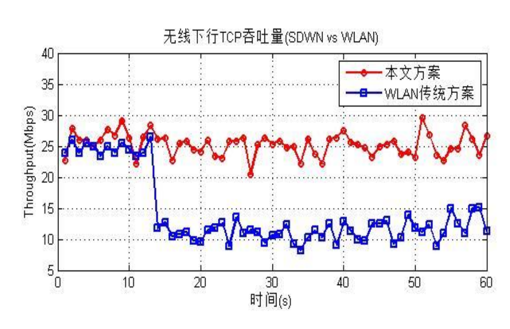


图 9 实验 2TCP 下行吞吐测试

图 10 为 SDWN 切换测试场景 2，在 AP 密集部署下，测实验证本文所提方法对减少乒乓效应的有效性，记录实验结果，并与传统方法作对比分析。

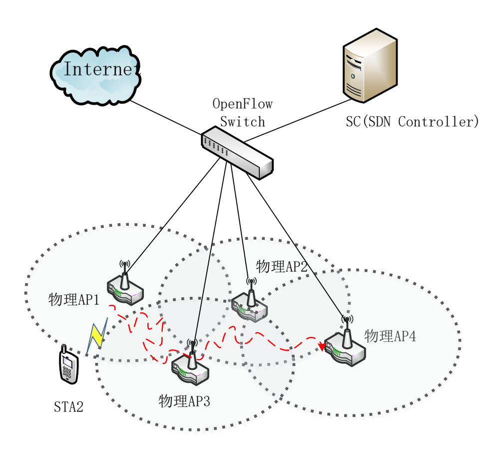


图 10 SDWN 切换测试场景 2

图 11 为切换统计结果，初始状态，只有 STA2 与 AP1 关联，终端从图中所示的箭头向 AP4 以不同的速度进行移动，重复实验 10 次，并记录 STA 的关联状态，最后统计平均切换次数。从下图可知，采用本文方案相比传统方法在切换次数方面有明显的减少，且随着速度的增大，切换次数逐渐减小。

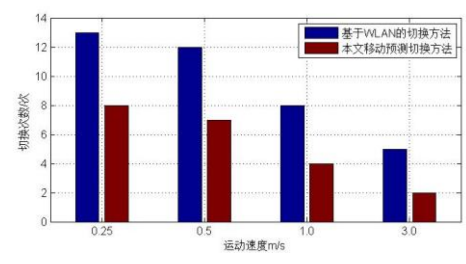


图 11 切换次数统计图

图 12 是本文 SDWN 系统网络时延测试，终端 ping 网络中的 AP，并记录其往返时间(round-trip, RTT),测试结果如下图所示。发生切换时，在 WLAN 中 STA 与 AP 的传输时延开始增大，在 46s-48s 左右会产生中断，时延增大至无限，然后与新接入点关联后，时延开始下降。在 SDWN 中，控制器将当前 LVAP 迁移至目标接入点，因此并没出现明显的中断，保证用户的上网服务质量。

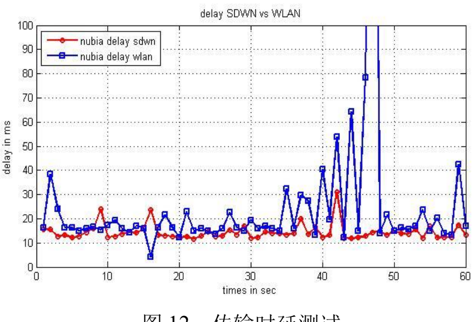


图 12 传输时延测试

4 结束语

本文提出了一种负载感知的 SLAH 算法来改善系统切换性能，通过构建 SDWN 测试实验来检验该方法的有效性。实验结果表明，相比于 WLAN 中传统 RSS 切换方式采用 SLAH 方法可以有效平衡 APs 间负载和减少频繁切换并能有效提高用户速率和网络资源的利用率。

参考文献：

[1] Keshav S, Shui Y, Yong X, Software-defined wireless networking opportunities and challenges for internet-of-things: a review [J]. IEEE Internet Things, 2016, 3 (4): 453-463.

[2] Lee D, Won D, Piran M, et al. Reducing handover delays for seamless multimedia service in ieee 802. 11 networks [J]. Electronics Letters, 2014, 50 (15): 1100-1102.

[3] Zhang Ning, Holtzman J M. Analysis of handoff algorithms using both absolute and relative measurements [J]. IEEE Trans on Vehicular Technology, 1996, 45 (1): 174-179.

[4] Kunarak S, Sulessathira R, Dutkiewicz E. Vertical handoff with predictive RSS and dwell time [C]// Proc of IEEE Region 10 Conference. 2013.

[5] Zou Deyue, Meng Weixiao, Han Shuai. Euclidean distance based handoff algorithm for fingerprint positioning of WLAN system [C]// Proc of Wireless Communications and Networking Conference. 2013.

[6] Bejerano Y, Han S J, Li L E. Fairness and load balancing in wireless lans using association control [C]// Proc of ACM MobiCom. 2004.

[7] Chen X, Qiao D. HaND: Fast handoff with null dwell time for IEEE 802. 11 networks [C]// Proc of INFOCOM. 2010: 1-9.

[8] Sood K, Yu S, Xiang Y. Software-defined wireless networking opportunities and challenges for internet-of-things: a review [J]. IEEE Internet Things, 2016, 3 (4): 453–463.

[9] Xu Chuan, Jin Wenglang, Zhao Guofeng. A novel multipath-transmission supported software defined wireless network architecture [J]. IEEE Access, 2017, 5: 2111-2125.

[10] Suresh L, Schulz-Zander J, Merz R, et al. Towards programmable enterprise wlans with odin [C]// Proc of the 1st Workshop on Hot Topics in Software Defined Networks. New York: IEEE Press, 2012: 115-120.

[11] Vestin J, Dely P, Kassler A, et al. CloudMAC: towards software defined WLANs [J]. ACM SIGMOBILE Mobile Computing & Communications Review, 2013, 16 (4): 42-45.

[12] Floodlight OpenFlow controller [EB/OL]. http://www. projectfloodlight. org.

[13] Lara A, Kolasani A, Ramamurthy B. Network innovation using OpenFlow: a survey [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2014, 16 (1): 493-512.

[14] IEEE standard 802. 11k-2008, part 11: wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications amendment 1: radio resource measurement of wireless LANs [S]. 2008.

[15] Tirumala A, Qin F, Dugan J, et al. The TCP/UDP bandwidth measurement too [EB/OL]. (2005-08-06) [2015-08-29]. http://dast. Nlanr. net/Projects.